



TITLE:

# EULER-POISSON方程式の解の構造 (流体のプラズマの数理解析)

AUTHOR(S):

牧野, 哲

---

CITATION:

牧野, 哲. EULER-POISSON方程式の解の構造(流体のプラズマの数理解析). 数理解析研究所講究録 1990, 734: 43-58

ISSUE DATE:

1990-12

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/102009>

RIGHT:

## EULER-POISSON 方程式の解の構造

大阪産業大 牧野 哲 (Tetu Makino)

### § 1. 問題設定

ここで研究するのは, 次の方程式である.

$$(1-0) \quad \frac{\partial \varrho}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 v_j \frac{\partial \varrho}{\partial x_j} + \sum_{j=1}^3 \varrho \frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0,$$

$$(1-i) \quad \varrho \left( \frac{\partial v_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial p}{\partial x_i} + \varrho \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} = 0, \quad i=1, 2, 3,$$

$$(1-4) \quad \frac{\partial S}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 v_j \frac{\partial S}{\partial x_j} = 0,$$

$$(2) \quad p = \varrho^\gamma e^S$$

$$(3) \quad \Delta \Phi = 4\pi \varrho.$$

ここで  $\gamma$  は定数で,  $1 < \gamma$  とし, 未知函数はとりあえず,

$\varrho = \varrho(t, x)$ ,  $v = v(t, x) = (v_1, v_2, v_3)$ ,  $S = S(t, x)$ ,  $\Phi = \Phi(t, x)$ ,  $(t \geq 0, x = (x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3)$ , である.

方程式(1)(2)(3)は、自己重力のもとで運動する気体星の内部構造の流体力学的進化のモデルを記述するものである。

$\rho$  は密度,  $p$  は圧力,  $v$  は速度を表わし, (1-0)は連続の方程式, (1-1)-(2)-(3)は運動方程式である。  $\Phi$  は重力ポテンシャルであって, これは Poisson 方程式(3)によって, 自己の密度分布  $\rho$  から生成される。(簡単のため万有引力定数は1にとっている。) 密度分布としては台がコンパクトのものを考えるので, (3)は NEWTON ポテンシャル

$$(3)' \quad \Phi(t, x) = - \int_{\mathbb{R}^3} \frac{\rho(t, y)}{|x - y|} dy$$

でおきかえる。(2)は理想気体の状態方程式である。 $S$ は単位質量あたりのエントロピーであって, (1)(2)のもとで(1-4)は熱源がなく, 断熱的な運動がおこなわれることを表わしている。比熱比  $\gamma$  としては, 単原子気体なら  $\gamma = 5/3$ , 二原子気体なら  $\gamma = 7/5$  である。以上のような方程式の宇宙物理学上の意味についての詳細は, [5]を参照されたい。

さて, 上記方程式にたいして次のような問題が考えられる。

1) 初期値問題にたいする時間にかんして局所的な解の存在と一意性

2) 時間的に大域的な解の存在・非存在

### 3) 定常解の安定性

これらの問題について最初に論じたのは[7]である。それ以降、いくつかの結果が得られたが、まだまだ不十分であり、より一層の研究が要望される。以下では、いままでに得られた結果をまとめて紹介したい。

### §2. 初期値問題にたいする局所解の構成

まず最初に、初期条件

$$(4) \quad g|_{t=0} = g^0(x) \geq 0, \quad v|_{t=0} = v^0(x), \quad S|_{t=0} = S^0(x)$$

を与えて(1)(2)(3)の解を作ることと問題にしよう。この問題については、次の結果が得られている。

定理1. ([9])  $g^0(x), v^0(x), S^0(x)$  は  $C^1(\mathbb{R}^3)$  に属し、 $g^0(x) \geq 0$  で台コンパクトとする。

$$(5) \quad U^0 = \left( (g^0)^{\frac{\gamma-1}{2}} e^{\frac{\gamma-1}{2\gamma} S^0}, \quad v^0, \quad S^0 \right)$$

とおく。もし I)  $1 < \gamma \leq 5/3$ ,  $U^0 \in H^3(\mathbb{R}^3)$  であるか、あるいは、II)  $1 < \gamma \leq 3$ ,  $U^0 \in H^4(\mathbb{R}^3)$ ,  $g^0 \in H^3(\mathbb{R}^3)$  ならば、充分小さな  $T$  にたいして、(1)(2)(3)の解  $(g(t, x), v(t, x),$

$S(t, x)$ ) で,  $C^1([0, T] \times \mathbb{R}^3)$  に属するものが存在する.

証明の方針は次のようである. 最初に任意に密度分布  $\varrho(t, x)$  をとり, (3)' によって重力ポテンシアル  $\Phi(t, x)$  をつくる. この勾配  $g(t, x) = -\text{grad}_x \Phi(t, x)$  を外力として EULER 方程式の初期値問題 (1)(2)(4) を解いて, 新たな密度分布  $\hat{\varrho}(t, x)$  が得られるであろう. すると, 写像  $\varrho \mapsto \hat{\varrho}$  が不動点をもつことが示せば, これが (1)(2)(3)(4) の解を与えるわけである.

こういう方針でいくと, 困難は, EULER 方程式を解くところにでてくる. いままで [6], [3] などでは圧縮性気体に対する EULER 方程式が解かれているが, そこではいつも,  $\inf \varrho^0 > 0$  の状況が扱われているのである. その状況下では, [4], [2], [6], [3] 等により, 方程式を準線型対称双曲型方程式に変換して, 解の局所的な存在はよくわかっているといえる. しかし, この変換は,  $\inf \varrho^0 = 0$  の場合は破綻する.  $\varrho = 0$  のところで方程式が退化してしまうのである. ところが, われわれの場合は, 台コンパクトが, 少なくとも遠方ではゼロになる密度分布を考えたい. じつは,  $\inf \varrho > 0$  なら, NEWTON ポテンシアルは発散してしまうであろう (OLBERS のパラドクス). そういうわけで, 新た

な工夫が必要となるわけである。この難点について一つの解決策を提起したのが[7], [9]である。

それは、次の変数を新たに導入することである。

$$(6) \quad w = p^{\frac{r-1}{2r}} = g^{\frac{r-1}{2}} e^{\frac{r-1}{2r} S}$$

方程式(1-0)で $g$ のかわりに $w$ を変数にとり、(1-1), -2), -3), では両辺を形式的に割り算すると(1)(2)(4)は次の問題に変換される。

$$(7) \quad A_0(U) \frac{\partial U}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 A_j(U) \frac{\partial U}{\partial x_j} = G(t)$$

$$(8) \quad U|_{t=0} = U^0(x)$$

ただし,  $U = {}^t(w, v_1, v_2, v_3, S)$ ,

$$G = {}^t(0, -\partial\Phi/\partial x_1, -\partial\Phi/\partial x_2, -\partial\Phi/\partial x_3) = {}^t(0, g_1, g_2, g_3),$$

$$A_0(U) = \begin{bmatrix} \frac{4r}{(r-1)^2} e^{\frac{S}{r}} & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_j(U) = \begin{bmatrix} \frac{4r}{(r-1)^2} e^{\frac{S}{r}} v_j & \frac{2r}{r-1} e^{\frac{S}{r}} w {}^t e_j & 0 \\ \frac{2r}{r-1} e^{\frac{S}{r}} w e_j & v_j I & 0 \\ 0 & 0 & v_j \end{bmatrix}.$$

ここに  $I$  は単位行列,  $e_j$  は単位ベクトルである。こうす

ると,  $A_\alpha(U)$  ( $\alpha=0,1,2,3$ ) は  $U$  について  $C^\infty$  級の対称行列で,  $A_0(U)$  は有界な  $S$  について一様正定値となり,  $w=0$  となってもなんら不都合はない. これは, [2] の定理 II がそのまま適用できる問題である. すなわち,  $G \in L^\infty([0, T]; H^{3+m}(\mathbb{R}^3)) \cap C([0, T]; H^{2+m}(\mathbb{R}^3))$ ,  $\|G\|_{3+m} \equiv \sup_t \|G(t)\|_{3+m} \leq M$ ,  $U^0 \in H^{3+m}(\mathbb{R}^3)$  を与えると, (7)(8) の解  $U \in C([0, T]; H^{3+m}(\mathbb{R}^3)) \cap C^1([0, T]; H^{2+m}(\mathbb{R}^3))$  が一意に存在する. ここに  $m$  は非負の整数,  $T \leq T_0 = T_0(U^0, M, m)$  である. このことを, 元の変数にもとすと,  $\mathcal{R}$  の命題が得られる.

命題 1. I)  $m \geq 0$ ,  $1 < \gamma \leq (m+5)/(m+3)$  とし,  $\varphi^0(x)$ ,  $\psi^0(x)$ ,  $S^0(x)$ ,  $g(t, x)$  が

$$\begin{aligned} \varphi^0(x) &\geq 0, \quad \varphi^0 \in C_0^1(\mathbb{R}^3), \quad U^0 \in H^{3+m}(\mathbb{R}^3), \\ g &\in L^\infty(0, T; H^{3+m}(\mathbb{R}^3)) \cap C([0, T]; H^{2+m}(\mathbb{R}^3)), \\ \|g\|_{3+m} &\leq M, \quad T \leq T_0(U^0, M, m) \end{aligned}$$

をみたすとするとき, (1)(2)(4) の  $[0, T] \times \mathbb{R}^3$  上の  $C^1$  解  $(\varphi(t, x), \psi(t, x), S(t, x))$  が存在して,  $\mathcal{R}$  をみたす:

$$\begin{aligned} \varphi(t, x) &\geq 0, \quad R[\varphi(t)] \leq R[\varphi^0] + C_I T, \\ \varphi &\in C([0, T]; H^{3+m}(\mathbb{R}^3)) \cap C^1([0, T]; H^{2+m}(\mathbb{R}^3)), \\ \|\varphi\|_{2+m} &\leq C_I, \\ \|\varphi(t) - \varphi(0)\|_{2+m} &\leq C_I \|g(t) - g(0)\|_{2+m} T e^{C_I T}. \end{aligned}$$

ここに,  $g_{(0)}, g_{(1)}$  は  $g_{(0)}, g_{(1)}$  に対応する解. また

$$R[u] = \sup\{|x| \mid u(x) \neq 0\}.$$

定数は,  $C_I = C_I(U^0, m)$ ,  $a_I = a_I(U^0, M, m)$ . 一方 II)

$m \geq 1$ ,  $1 < \gamma \leq 3$  とし, 先と同じ仮定のもとで, さらに

$g^0 \in H^{2+m}(\mathbb{R}^3)$  とすると,

$$g(t, x) \geq 0, \quad R[g(t)] \leq R[g^0] + C_{II} T,$$

$$g \in C([0, T]; H^{2+m}) \cap C^1([0, T]; H^{1+m}),$$

$$\|g\|_{2+m} \leq C_{II} \|g^0\|_{2+m},$$

$$\|g_{(1)} - g_{(0)}\|_{1+m} \leq C_{II} \|g^0\|_{2+m} \|g_{(1)} - g_{(0)}\|_{2+m} T^2 e^{C_{II} T}$$

ここに,  $C_{II} = C_{II}(U^0, m)$ ,  $a_{II} = a_{II}(U^0, M, m)$ .

ここで解の一意性についていうと, それはあくまでも,  $(g, v, S)$  から  $U$  に移ったばかりに, (7) をみたす  $U \in C([0, T]; H^3) \cap C^1([0, T]; H^2)$  として一意に定まるという意味である.

さて一方, Poisson方程式とNEWTONポテンシャルで解く方については, 次が容易に証明できる.

命題2 ([7])  $m$  は非負の整数とする.  $g \in H^{2+m}(\mathbb{R}^3) \subset C^m(\mathbb{R}^3)$  が台コンパクトなら,  $g(x) = -\operatorname{grad} \Phi(x)$  は  $H^{3+m}(\mathbb{R}^3)$  に属し,

$$\|g\|_{3+m} \leq C_{III} (1 + R[g])^{5/2} \|g\|_{2+m}$$

をみたす. ここに  $C_{III} = C_{III}(m)$ .



命題1, 命題2 をくみあわせれば,  $\varphi \mapsto \hat{\varphi}$  の不動点を  
次のようなところで求めることができる.

I)  $m \geq 0$ ,  $1 < \gamma \leq (5+m)/(m+3)$  の場合は,

$$X_I = \left\{ \varphi \in C([0, T]; H^{2+m}(\mathbb{R}^3)) \mid \varphi \geq 0, \right. \\ \left. R[\varphi(t)] \leq R[\varphi^0] + 1, \|\varphi\|_{2+m} \leq C_I(U^0, m) \right\}$$

ただし,  $T$  は充分小ととる.  $X_I$  に距離

$$\text{dis}(\varphi_{(1)}, \varphi_{(2)}) = \|\varphi_{(1)} - \varphi_{(2)}\|_{2+m}$$

をいれると完備になり,  $\varphi \mapsto \hat{\varphi}$  は縮小写像となる.

II)  $m \geq 1$ ,  $1 < \gamma \leq 3$  の場合は,

$$X_{II} = \left\{ \varphi \in L^\infty(0, T; H^{2+m}(\mathbb{R}^3)) \cap C([0, T]; H^{1+m}) \mid \right. \\ \left. \varphi \geq 0, R[\varphi(t)] \leq R[\varphi^0] + 1, \|\varphi\|_{2+m} \leq C_{II} \|\varphi^0\|_{2+m} \right\}$$

で  $T$  を充分小さくとり, 距離

$$\text{dis}(\varphi_{(1)}, \varphi_{(2)}) = \|\varphi_{(1)} - \varphi_{(2)}\|_{1+m}$$

をいけばよい.

こうして, 定理1が証明される.

### §3 定理1の改良の必要性

このようにして [7][9] でまがり<sup>(なり)</sup>に初期値問題(1)(2)(3)  
(4) の  $C^1$ -級解の存在が得られたのであるが, そのときから  
定理1の不充分性が気づかれていた. そのひとつは, 解の一

一意性がしをまわってしかいえず,  $(\varrho, v, S)$  についての一意性が不明であることである.  $\varrho$  の台の外で  $v$  を修正しても ( $S = \text{const}$  なら) やはり解であるから, 一意性の問題は自明でない.

もっと致命的な欠点は次のことである. 簡単のため  $S = 0$  としよう. このとき,  $6/5 < \gamma \leq 2$  にたいして (1)(2)(3) は次の形の台コンパクトな球対称定常解をもつ.

$$\varrho = \left( \frac{\gamma-1}{\gamma A^2} \right)^{\frac{1}{2-\gamma}} \theta(A|x|)^{\frac{1}{\gamma-1}}, \quad v=0, \quad S=0$$

ここに  $\theta(r)$  は LANE-EMDEN 方程式の解:

$$\frac{d^2\theta}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\theta}{dr} + \theta^{\frac{1}{\gamma-1}} = 0, \quad \theta|_{r=0} = 1, \quad \frac{d\theta}{dr} \Big|_{r=0} = 0$$

であり ([1], 才IV章参照),  $A$  は任意の正の定数である. ところが, この解にたいしては,  $w \sim \text{const} (R-r)^{1/2}$  ( $r \uparrow R$ ), ただし,  $R = R[\varrho]$ , となり, この解は, 定理 I の扱う範囲 ( $U^0 \in H^3(\mathbb{R}^3)$ ) を大いに逸脱しているのである. つまり, 定理 1 で構成した解の範囲は狭すぎて, これではこの定常解を捕捉しえない. すなわち, 定理 1 で構成したのは, 次の意味で「おとなしい」解に限られているのである.

定義 .  $(\varrho, v, S)$  が (1)(2)(3) の  $0 \leq t < T$  でのおとなしい解であるとは, 1)  $(\varrho, v, S) \in C^1([0, T) \times \mathbb{R}^3)$ ,

$\varrho \geq 0$ ,  $\varrho(t)$  は台コンパクトで, (1)(2)(3)' がみたされ,

ii)  $\varrho^{\frac{\alpha-1}{2}} \in C^1([0, T) \times \mathbb{R}^3)$  で, しかも  $\varrho$  の台の外で

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \quad (i=1, 2, 3)$$

がなりたつ. これにたいして, i) のみをみたす解を古典解とよぶ.

すなわち, 定理1で構成したのは, おとなしい解のみであり, 一方球対称定常解は, 古典解だがおとなしくないのである.

#### §4. 大域的におとなしい解の非存在.

われわれが次に考えたのは, こうして作ったおとなしい局所解は, 時間  $\infty$  まで大域的に延長できるかどうかという問題であった. これは, SIDERIS [11] に触発されたものである. われわれは, まず, 重力を無視した場合を扱った. すなわち, 方程式 (1-1), (2), (3) で  $-\partial \Phi / \partial x_i$  の項をおとし, (3) を無視した問題を考へる. これを (1)<sub>0</sub>, (2) とする.

定理2 ([8]).  $(\varrho(t), v(t), S(t))$  が  $0 \leq t < T$  での

(1), (2)のおとなしい解とし,  $(\varphi(0), \psi(0))$  は台がコンパクトで,  $\varphi(0) \neq 0$  とする. このとき,  $T$  は有限である.

この結論の証明は, 次の2ステップからなる.

ステップ1. まずおとなしい解については, 台が広がらないことがわかる:

$$\text{Supp}(\varphi(t), \psi(t)) \subset \text{Supp}(\varphi(0), \psi(0)).$$

ステップ2. おとなしい解に沿っては, 総質量

$$M = \int_{\mathbb{R}^3} \varphi(t, x) dx$$

と総エネルギー

$$E = \int \left[ \frac{1}{2} \varphi(t, x) |\psi(t, x)|^2 + \frac{1}{s-1} \rho(t, x) \right] dx$$

が保存される ( $t$  に依らない) ことに注意して, 次の函数に着目する:

$$(9) \quad H(t) = \frac{1}{2} \int_{\mathbb{R}^3} \varphi(t, x) |x|^2 dx.$$

すると, 一方で  $H(t) \leq \frac{1}{2} M R^2$  ( $R$  は  $\text{Supp}(\varphi(0), \psi(0))$  の半径), 他方で

$$H''(t) = \int (\varphi \psi^2 + 3\rho) dx \geq \inf(2, 3(s-1)) E \equiv \alpha E$$

が得られ, これから

$$T \leq -\frac{H'(0)}{\alpha E} + \sqrt{\frac{\alpha^2 M - 2H(0)}{\alpha E} + \frac{H'(0)^2}{\alpha^2 E^2}}$$

という存在時間の制限を得るわけである.

もっとも, これは, 有限時間で解がおとなしくなくなる

ということを証明したにすぎず、それでは具体的に何が起、  
ておとなしくなくなるかという疑問に答えたわけではない。  
おそらく台の境界でショックが起こるかなにかするのだろう  
が、今のところ全くわからない。

同じ結論が、自己重力のある元の(1)(2)(3)のおとなしい  
解についてもなりたつのではないということが次に考えた  
ことである。しかし、重力を無視した場合と同様に2ステッ  
プで考えるとすると、台の評価をまずしなければならぬが、  
重力のあることによって同じようにはいかない。しかし、ま  
ず、球対称の場合に限って結果を得た。ここに、球対称とい  
うのは、 $\rho = \rho(t, |x|)$ ,  $v = \frac{x}{|x|} V(t, |x|)$ ,  $S = S(t, |x|)$   
の形の解であり、方程式は次のようになる。

$$(1)_r \quad \begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + V \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\rho}{r} V = 0 \\ \rho \left( \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial p}{\partial r} + \rho \frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial t} + V \frac{\partial S}{\partial r} = 0 \end{cases} \quad (0 \leq r = |x| < +\infty)$$

$$(2) \quad p = \rho^r e^S$$

$$(3)_r \quad \begin{aligned} \Phi(t, r) &= -4\pi \int_0^\infty K(r, s) \rho(t, s) s^2 ds, \\ K(r, s) &= \begin{cases} \frac{1}{r} & (s \leq r) \\ \frac{1}{s} & (r \leq s) \end{cases} \end{aligned}$$

こうした球対称解に話を限れば、次の結果を得る。

定理3 ([10])  $(\rho(t), v(t), S(t))$  が  $0 \leq t < T$  での (1)(2)(3) の球対称なおとなしい解とし、 $(\rho(0), v(0))$  の台がコンパクトで、 $\rho(0) \neq 0$  ならば、 $T$  は有限である。

この証明は、ステップ1だけで終る。じょい、 $R(t) \equiv \sup \{ r \mid \rho(t, r) \neq 0 \text{ or } v(t, r) \neq 0 \}$  は、

$$R(t) \leq R(0) - \frac{M}{2R(0)^2} t^2$$

をみたすことがわかる。総質量  $M = 4\pi \int \rho r^2 dr$  が正であれば、 $T \leq \sqrt{2R(0)^3/M}$  でないと星は自己重力で一点につぶれてしまうということがでて、証明が終る。

この場合も、限界までおとなしければ、collapseしかないということだけで、実際はその限界までに何かがおこっておとなしくなくなるのである。球対称でない場合も事情は同じだろうと予想しているが、今のところ<sup>(その証明に)</sup>成功していない。

## §5 おとなしくない古典解にたいするひとつの情報

定理3の証明は、1ステップで終ったのであるが、重力のある場合にも、定理2の証明の第2ステップで(9)で定義

した  $H(t)$  を利用すれば, おとなくない古典解の挙動についての情報をひとつひきだすことができる. すなわち, (1)(2)(3) の古典解に沿って総質量

$$M = \int \rho(t, x) dx$$

と総エネルギー

$$E = \int \left[ \frac{1}{2} \rho(t, x) v(t, x)^2 + \frac{1}{\gamma-1} p(t, x) \right] dx - \frac{1}{2} \iint \frac{\rho(t, x) \rho(t, y)}{|x-y|} dx dy$$

は保存される. そこで  $H(t)$  を考えると,

$$H''(t) = \int (\rho v^2 + 3p) dx - \frac{1}{2} \iint \frac{\rho(t, x) \rho(t, y)}{|x-y|} dx dy$$

を得る. したがって,  $3 \geq 1/(\gamma-1)$  すなわち  $\gamma \geq 4/3$  なら  $H''(t) \geq E$  となる. こうして, 次のことが得られる.

定理4 ([10])  $(\rho(t), v(t), S(t))$  が  $0 \leq t < +\infty$  の (1)(2)(3) の古典解 (おとなくない) とし,  $E > 0$ ,  $\gamma \geq 4/3$  ならば,  $\liminf_{t \rightarrow +\infty} R(t)/t \geq \sqrt{E/M}$ . ここに  $R(t) = \sup\{|x| \mid \rho(t, x) \neq 0\}$ .

この定理から, たとえば, 次のようなことがわかる. §3 で考えた球対称定常解については

$$E = \frac{4-3\gamma}{\gamma-1} \int p dx$$

であることがわかる. したがって,  $\gamma = 4/3$  のとき, 初期密度分布  $\rho^0$  がこの球対称定常解に等しく,  $S^0 \equiv 0$  とし,  $\varphi$  に

小さな擾動を与えると、その解は、もし  $0 \leq t < +\infty$  に存在したとしても  $\liminf R(t)/t > 0$  をみたさなければならぬ。したがって、 $\gamma = 4/3$  の球対称定常解は、この意味で「不安定」である。

## § 6 結語

EULER-POISSON方程式について現時点までに得られた結果を総括してみた。結果がいくつか得られたとはいえ、あまりにも遅々としている。それにもまして、おとなくない古典解の、球対称定常解を含む範囲での局所的存在定理を証明すること、大域解の存在を明らかにすることは、重要な問題である。これは、基礎理論からの構築を要するかもしれない。この方程式は、そういう点で、豊富な内容をもつと思われるので、この方程式を考察する人がふえ、上記の問題が近い将来に解決されることを期待したい。

一九八九年一月八日 記

## 引用文献

- [1] S. Chandrasekhar, An Introduction to the Study of Stellar Structure, Univ. of Chicago Press, 1938.



- |2| T. Kato, The Cauchy problem for quasi-linear symmetric hyperbolic systems, Arch. Rational Mech. Anal., 58(1975), 181-205.
- |3| S. Klainerman and A. Majda, Compressible and incompressible fluids, Comm. Pure Appl. Math., 35(1982), 629-651.
- |4| P. D. Lax, Hyperbolic systems of conservation laws and the mathematical theory of shock waves, SIAM Reg. Conf. Lecture No.11, Philadelphia, 1973.
- |5| P. Ledoux and T. Walraven, Variable stars, Handbuch der Physik, Bd. LI (1958), Springer, Berlin, 353-604.
- |6| A. Majda, Compressible Fluid Flow and Systems of Conservation Laws in Several Variables, Springer, 1984.
- |7| T. Makino, On a local existence theorem for the evolution equation of gaseous stars, Patterns and Waves, North-Holland/Kinokuniya, 1986, 459-479.
- |8| T. Makino, S. Ukai and S. Kawashima, Sur la solution à support compact de l'équation d'Euler compressible, Japan J. of Appl. Math., 3(1986), 249-257.
- |9| T. Makino and S. Ukai, Sur l'existence des solutions locales de l'équation d'Euler-Poisson pour l'évolution d'étoiles gazeuses, J. of Math. of Kyoto U niv., 27(1987), 387-399.
- |10| T. Makino and B. Perthame, Sur les solution à symétrie sphérique de l'équation d'Euler-Poisson pour l'évolution d'étoiles gazeuses, to appear in Japn J. of Appl. Math.
- |11| T. Sideris, Formation of singularities in three-dimensional compressible fluids, Comm.Math.Phys. 101(1985) 475-485.